

Ю.А. Педенко

Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: pedenko@ire.kharkov.ua

Радиолокационное многочастотное измерение углов места маловысотных целей над морем с использованием метода *root-MUSIC*

Предмет и цель работы. Статья посвящена проблеме высокоточных радиолокационных измерений координат целей, расположенных на малой высоте вблизи взволнованной поверхности моря. В таких условиях точным измерениям, наряду с тепловыми шумами приемника радиолокационной станции (РЛС), препятствуют помехи, создаваемые отражениями радиоволн от моря, принимаемые антенной РЛС наравне с полезными сигналами от цели. Особенно остро стоит проблема измерений углов места целей.

Методы и методология работы. Известен ряд методов, позволяющих существенно повысить точность измерений, в том числе метод *root-MUSIC*. В настоящей работе выполнено исследование возможности повышения эффективности этого метода за счет многочастотных измерений. Оно проводилось путем компьютерного моделирования с использованием трехчастотной РЛС X -диапазона. При моделировании использовались типичные условия: длина трассы – 2000 м, высота антенной решетки на уровне моря – 12 м, угловая высота цели – от 0,2 до 0,5°. Эффективность многочастотных измерений определялась путем сравнения их с результатами одночастотных измерений в идентичных условиях, в том числе при различных уровнях помех от моря и тепловых шумов в приемных каналах РЛС.

Результаты работы. Предварительно выполнен анализ распределений ошибок измерения, полученных при обычных одночастотных измерениях, в различных фазах интерференционной структуры поля принимаемых сигналов. Его выводы послужили обоснованием многочастотного режима работы как средства уменьшения ошибок измерения угла места цели. Исследованы зависимости ошибок измерения от угла места цели при различных реальных разносах частот. Предложен и испытан алгоритм формирования обобщенной оценки угла места на основе трех частных оценок, полученных на каждой из рабочих частот. Обоснована величина разноса рабочих частот, при котором ошибки измерения достигают минимальных значений.

Заключение. Показано, что одновременное использование трех рабочих частот позволяет уменьшить ошибки измерения не менее чем на 20...40 % по сравнению с работой на одной частоте. Ил. 8. Табл. 2. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: *root-MUSIC*, многочастотная РЛС, маловысотная цель, угол места, многолучевое распространение, тепловой шум, моделирование, ошибки измерения.

Известно, что радиолокационное сопровождение маловысотных целей происходит в условиях многолучевого распространения, связанного с отражением радиоволн от поверхности суши или моря. Многолучевые сигналы, поступающие на вход приемного устройства радиолокационной станции одновременно с полезным прямым сигналом от цели, приводят к ошибкам измерения координат цели, в частности, угла

места [1]. Одним из методов, позволяющих уменьшить эти ошибки, является метод высокого спектрального разрешения *MUSIC* [2]. Вариант этого метода *root-MUSIC* [3] был успешно испытан нами ранее путем компьютерного моделирования, а результаты испытаний опубликованы в ряде работ [4–7].

При их выполнении в числе прочего осуществлялся анализ распределений ошибок из-

мерения. Он выявил наличие ошибок, находящихся вдали от максимума их распределения, т. е. ошибок, величина которых в несколько раз превосходила их среднеквадратическое отклонение (СКО). При этом вероятность выбросов ошибок возрастала с увеличением коэффициента диффузного отражения и уменьшением отношения сигнал/шум (ОСШ). В качестве шума рассматривались тепловые шумы в приемных каналах РЛС. Несмотря на невысокую вероятность этих выбросов, они заметно ухудшали статистические показатели ошибок измерения. Отмечено также возрастание ошибок в минимумах и максимумах поля, создаваемого интерферирующими сигналами от цели и ее зеркального отражения.

На основании изложенного становится понятным, что исключить или хотя бы уменьшить выбросы ошибок можно путем использования измерений при несколько отличающихся условиях – подразумевается, что измеряемая угловая высота цели при этом остается практически неизменной. Если измерения разнести по времени, то трансформация условий происходит за счет смены диффузных отражателей и реализаций теплового шума. Однако такой подход возможен лишь при наличии времени, достаточного для такой смены, что в реальной обстановке не всегда возможно. В связи с этим предметом изучения в данной работе являются измерения, выполняемые с использованием сигналов, принятых антенной решеткой одновременно. В этой ситуации реализация отличающихся условий может быть выполнена за счет многочастотной работы в пределах одного частотного диапазона. Исследованию возможности повышения точности измерений углов места маловысотных целей с использованием метода *root-MUSIC* за счет многочастотного режима работы посвящена данная статья.

1. Методика исследований. Исследования проводились путем численного моделирования на ЭВМ по методике, аналогичной применявшейся в упомянутых выше работах [4–7].

Геометрия трассы, использовавшаяся при моделировании, представлена на рис. 1.

На нем использованы следующие обозначения: A – вертикальная приемная антенная решетка, T – имитатор цели, D_n, D_f – «блестящая поверхность», из которой поступают диффуз-

ные отражения, S – точка зеркального отражения. Для исследования были выбраны типичные исходные условия: $D = 2$ км – расстояние между источником излучения и антенной РЛС, $h_r = 12$ м – высота центра антенны РЛС над поверхностью моря, $\beta_{\max} = 0,05$ – максимальный наклон неровностей морской поверхности при равномерном распределении наклонов; $\varepsilon = 0,2 \dots 0,5 \Theta_{0,5}$ – относительная угловая высота цели над поверхностью раздела ($\Theta_{0,5}$ – ширина диаграммы направленности по уровню половинной мощности, которую можно сформировать с помощью раскрытия используемой антенной решетки).

Длина волны на центральной частоте равнялась $\lambda_0 = 3,2$ см, расстояние между элементами решетки – $\lambda_0 / 2$, количество элементов решетки $N = 156$. В результате вертикальный размер решетки составлял около 2,5 м, а ширина диаграммы направленности $\Theta_{0,5} = 1^\circ$. При дальнейшем изложении величины углов места и ошибки измерения угла места представлены по отношению к $\Theta_{0,5}$. Параметры шероховатости, использовавшиеся для определения коэффициентов зеркального и диффузного отражения (табл. 1), вычислялись в виде

$$q = \sigma_h \sin(\psi_s / \lambda_0),$$

где σ_h – среднеквадратическая высота морских волн; ψ_s – угол скольжения радиоволны в точке зеркального отражения S .

Исследования выполнялись в три этапа.

На первом этапе вычислялись реализации электромагнитных полей на элементах приемной решетки. Поля создавались имитатором цели, представляющим собой точечный изотропный многочастотный источник излучения. Для вычислений использовалась методика, описанная в работе [8]. Для каждого сочетания исходных параметров, в том числе длины

Таблица 1. Параметры шероховатости (q) и соответствующие им коэффициенты диффузного (ρ_d) и зеркального (ρ_s) отражений

q	ρ_d / ρ_s	Характеристика отражения
0,031	0,10/0,93	Сильное зеркальное отражение
0,052	0,20/0,81	–
0,074	0,30/0,65	–
0,093	0,36/0,50	Сильное диффузное отражение

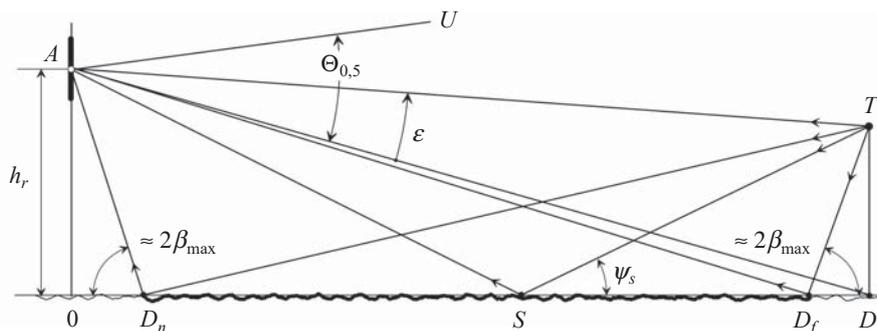


Рис. 1. Геометрия трассы

трассы, высоты центра приемной антенны, угловой высоты имитатора цели, коэффициентов зеркального и диффузного отражения, рабочих частот, вычислялось достаточно большое количество реализаций поля сигналов, необходимое для обеспечения достоверности выводов об ошибках измерения угла места. Эти реализации отличались друг от друга только используемым для их вычисления исходным набором множества элементарных диффузных отражений, описываемых случайными параметрами: амплитудой, фазой отражения и положением на «блестящей поверхности».

При вычислениях использовался ряд допущений. Так, фаза и амплитуда элементарных диффузных отражений, а также положение фазовых центров площадок, создающих эти отражения, относящиеся к текущей реализации поля, полагались одинаковыми на всех рабочих частотах. Это было вызвано тем, что в рамках используемой модели поля [8] эти величины не имеют прямой функциональной зависимости от частоты сигнала. Следствием является тот факт, что степень частотной декорреляции сигналов на элементах приемной антенной решетки при моделировании будет меньше, чем в реальных условиях. В связи с этим ожидаемое улучшение эффективности многочастотного метода *root-MUSIC* по сравнению с одночастотным по результатам моделирования следует рассматривать в качестве нижнего предела такого улучшения.

Расчет реализаций поля принимаемых сигналов проводился в диапазоне разностей фаз между прямым и зеркальным сигналами в центре решетки $\Delta\varphi = 0, 20, 40 \dots 360^\circ$, относящихся к центральной рабочей частоте. При моделировании заданные значения разности фаз при неизменных остальных параметрах задавались

путем искусственного изменения фазы отражения зеркального сигнала от поверхности раздела (в действительности фаза отражения при скользких углах распространения радиоволн близка к 180°). Требуемого результата можно достичь и другими способами, например, за счет изменения высоты антенны РЛС. Однако выбранный путь способствовал упрощению процесса моделирования и интерпретации полученных результатов.

В результате выполнения первого этапа создавалась база данных, содержащая реализации комплексных сигналов на элементах вертикальной антенной решетки A_{jn} (j – порядковый номер рабочей частоты РЛС; $n = 1, 2, \dots N$ – номер элемента решетки, начиная с нижнего). Количество реализаций для каждого сочетания параметров трассы составляло в разных опытах от 2 до 10 тысяч для каждой из рабочих частот. Количество рабочих частот J в исследовании было выбрано равным 3, а разности между ними – 2, 4 и 8 % от центральной частоты, что можно без затруднений реализовать на практике.

В настоящем исследовании использовались априорные параметры метода, при которых реализовывалась высокая точность измерений в широком диапазоне уровней диффузного отражения: размерность подпространства сигналов $M = 5$, количество пространственных выборок сигнала $K = 26$, порядок автокорреляционной матрицы принятых сигналов $p = 9$. Основой такого выбора послужили выводы работы [7], в которой изучалось влияние априорных параметров метода *root-MUSIC* на точность измерений при учете помех, создаваемых как многолучевыми сигналами, так и тепловыми шумами.

Чтобы получить заданное количество пространственных выборок, основная решетка, состоявшая из N элементов, разбивалась на

$K = 26$ смежных подрешеток, включающих по $I = 6$ элементов каждая. На базе каждой из подрешеток синтезировалась приемная антенна и рассчитывался принимаемый ею сигнал.

Весовые коэффициенты для элементов подрешеток рассчитывались с использованием функции Хэмминга, что обеспечивало уровень боковых лепестков синтезированных антенн не более -40 дБ. Пространственная выборка принимаемых сигналов, которая формировалась приемной антенной, синтезированной на базе k -й подрешетки, вычислялась по формуле:

$$\dot{U}_k = \sum_{i=1}^I \dot{a}_{ki} G_i + \dot{w}_k.$$

Здесь $\dot{a}_{ki} = \dot{A}_{i+I(k-1)}$ – сигнал на i -м элементе k -й подрешетки; G_i – значение весового коэффициента на i -м элементе подрешетки; \dot{w}_k – тепловой шум в k -м приемном канале, причем

$$\dot{w}_k = (x_k + jy_k) a_{\text{dir}} \sum_{i=1}^I G_i,$$

где a_{dir} – амплитуда прямой волны на каждом из N элементов антенной решетки, ОСШ – в нашем случае представляет отношение амплитуды прямого сигнала от цели, принятого каждой из элементарных антенн, к среднеквадратической амплитуде тепловых шумов подключенного к ней приемного канала; x_k, y_k – независимые случайные числа с нулевыми средними и дисперсиями 0,5, распределенные по нормальному закону. Отношение сигнал/шум в каждом из приемных каналов задавалось равным $\infty, 40, 30$ и 20 дБ.

На втором этапе моделировалось измерение углов места. Для каждого независимого сочетания диффузных отражателей было получено по три частных оценки угла места источника излучения, каждая из которых относилась к соответствующей рабочей частоте. Эти частные оценки использовались для определения обобщенной оценки, которая и принималась за измеренный угол места цели. Для получения обобщенной оценки был предложен и использован следующий алгоритм:

1. Если все три частных оценки находятся в диапазоне угловых высот $0 \dots \Theta_{0,5}$ ($\angle UAD$ на рис. 1), то за обобщенную оценку принимается среднеарифметическое значение толь-

ко двух наименее отличающихся друг от друга частных оценок.

2. Если в указанный диапазон попадают только две частных оценки, то обобщенное значение вычисляется как среднеарифметическое этих частных оценок.

3. Если в указанный диапазон попадает только одна частная оценка, то она принимается за обобщенную оценку.

4. Если все частные оценки попадают за пределы диапазона $0 \dots \Theta_{0,5}$, то за обобщенную оценку принимается значение $0,5\Theta_{0,5}$.

Оценка, относящаяся к центральной частоте, принималась за измеренный угол места при одностороннем режиме работы.

На третьем этапе проводилась статистическая обработка полученных результатов. Были найдены распределения ошибок измерения угла места цели для конкретных разностей фаз между прямым и зеркальным сигналами в центре решетки ($\Delta\varphi = 0^\circ, 100^\circ$ и 180°), а также распределения, усредненные по диапазону разностей фаз, расположенных равномерно на интервале от 0 до 360° . Для тех же условий были получены среднеквадратические значения ошибок измерения угла места. Также была оценена эффективность многочастотных измерений по сравнению с односторонними.

2. Результаты моделирования. Рассмотрим представленные на рис. 2 и 3 распределения ошибок, полученные при односторонних измерениях, для нескольких типичных случаев интерференции прямого и зеркального сигналов: в максимуме поля ($\Delta\varphi = 0^\circ$), в минимуме поля ($\Delta\varphi = 180^\circ$) и в промежуточном случае ($\Delta\varphi = 100^\circ$). Графики на рис. 2 получены при отсутствии шумов в приемных каналах, т. е. при ОСШ = ∞ , а на рис. 3 – при их высоком уровне, ОСШ = 20 дБ. Верхние графики на этих рисунках получены при сильном зеркальном отражении ($\rho_d = 0,1; \rho_s = 0,93$), а нижние – при сильном диффузном отражении ($\rho_d = 0,36; \rho_s = 0,50$).

Отметим следующие особенности распределений:

- Ширина центральной области распределений в промежуточном случае уже, чем в экстремумах поля.

- Пики распределений в промежуточном случае интерференции расположены в области

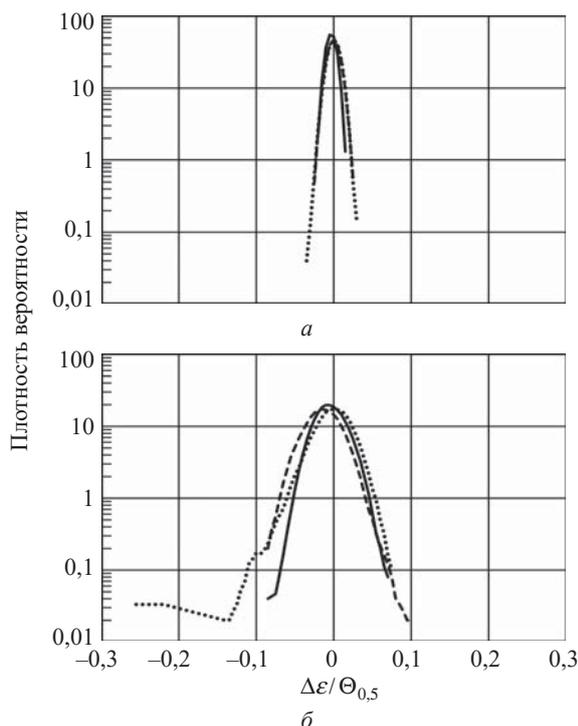


Рис. 2. Распределение ошибок измерения угла места при одночастотных измерениях, ОСШ = ∞: *a* – сильное зеркальное отражение; *b* – сильное диффузное отражение; ----- – максимум поля; ———— – промежуточная ситуация; – минимум поля

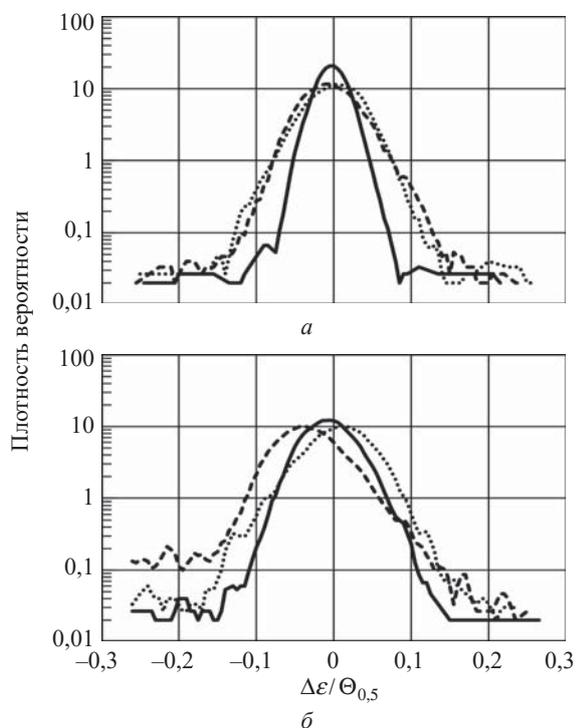


Рис. 3. Распределение ошибок измерения угла места при одночастотных измерениях, ОСШ = 20 дБ: *a* – сильное зеркальное отражение; *b* – сильное диффузное отражение; ----- – максимум поля; ———— – промежуточная ситуация; – минимум поля

минимальных ошибок измерения независимо от уровня помех. В то же время пики распределения в экстремумах поля смещены (в максимуме поля – в сторону поверхности моря, в минимуме – в противоположную сторону). Величина смещения повышается как с ростом диффузного отражения, так и с ростом шумов в приемных каналах.

- «Хвосты» распределений в промежуточных случаях интерференции либо отсутствуют (рис. 2), либо их уровень значительно ниже, чем в экстремумах поля (рис. 3).

Анализ этих особенностей приводит к выводу, что для снижения ошибок следует избегать измерений вблизи экстремумов поля. И, хотя предложенный в данной работе способ уменьшения ошибок, в основу которого положена многочастотная работа, не исключает полностью такой ситуации, все же в достаточно высокой степени позволяет уменьшить ее вероятность.

Рассмотрим распределения ошибок при многочастотной работе. Они представлены на рис. 4 и 5. Уровни помех, при которых они получены, те же, что на рис. 2 и 3 соответственно. На рис. 4 и 5 для сравнения показаны также распределения, относящиеся к одночастотной работе. Распределения, приведенные на них, получены при равномерном распределении разностей фаз между прямым и зеркальным сигналом $\Delta\varphi$ на интервале $0 \dots 360^\circ$ (в случае многочастотной работы эти разности относятся к центральной рабочей частоте).

Анализ распределений, представленных на рис. 4 и 5, показывает, что при переходе от одночастотного к многочастотному режиму работы происходят следующие изменения:

- сужается ширина центральной области распределений;
- снижается до нуля либо становится ничтожно малым уровень «хвостов» распределений.

Благодаря этим изменениям происходит заметное уменьшение среднеквадратических ошибок измерения угла места. Об этом можно судить по данным на рис. 6. На каждом графике представлено по четыре зависимости ошибок измерения в функции действительной угловой высоты имитатора цели. Одна из них получена при одночастотных, а остальные три – при

многочастотных измерениях с использованием различных разносов частот Δf . Данные охватывают широкий диапазон уровней диффузного и зеркального отражения и тепловых шумов в приемных каналах.

Графики организованы в виде таблицы размером 3×4 . Каждая ее строка получена при соответствующем ОСШ (указано с правой стороны каждой строки графиков), а каждый столбец соответствует одному из сочетаний уровней диффузного и зеркального отражения (указан над каждым столбцом). Главный вывод, следующий из анализа рис. 6, состоит в том, что многочастотный режим работы, несомненно, позволяет повысить точность измерений, так как кривые ошибок в этом режиме во всех без исключения условиях лежат ниже кривых, относящихся к одночастотным измерениям.

Также видно, что увеличение разноса частот приводит в той или иной степени к уменьшению ошибок измерения. Степень этого уменьшения зависит как от угловой высоты источника излучения, так и от величины и типа помех.

Следует отметить, что при одночастотных измерениях тепловые шумы существенно увеличивают ошибки измерения. Особенно сильно их влияние проявляется при сильном зеркальном отражении, когда уровень диффузного отражения по сравнению с уровнем тепловых шумов становится меньше, а интерференционные минимумы и максимумы поля выражены более глубоко. Однако именно в этом случае многочастотная работа особенно эффективна. Дело в том, что в отличие от помех, создаваемых диффузным отражением, тепловые шумы в различных частотных каналах, относящихся к одному и тому же элементу решетки, независимы друг от друга при любых разносах частот. Это способствует резкому уменьшению ошибок измерения при переходе к многочастотной работе, если помехи представлены в основном тепловыми шумами. Это хорошо видно во второй и третьей строке графиков на рис. 6, особенно при возрастании уровня зеркального отражения.

Для оценки эффективности многочастотных измерений воспользуемся параметром δ , представляющим отношение разности среднеквадратических ошибок измерения при одночастотных и многочастотных измерениях к пер-

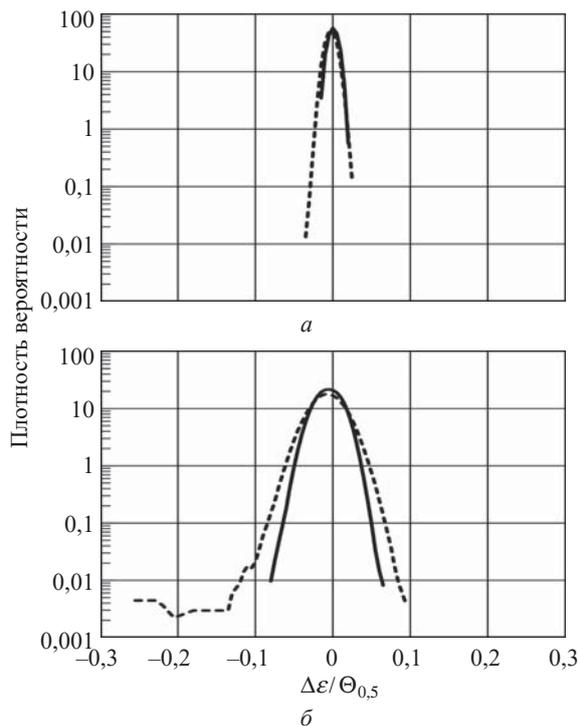


Рис. 4. Распределение ошибок измерения угла места при многочастотных измерениях, ОСШ = ∞: а – сильное зеркальное отражение; б – сильное диффузное отражение; ----- – измерения на одной частоте, ——— – многочастотные измерения

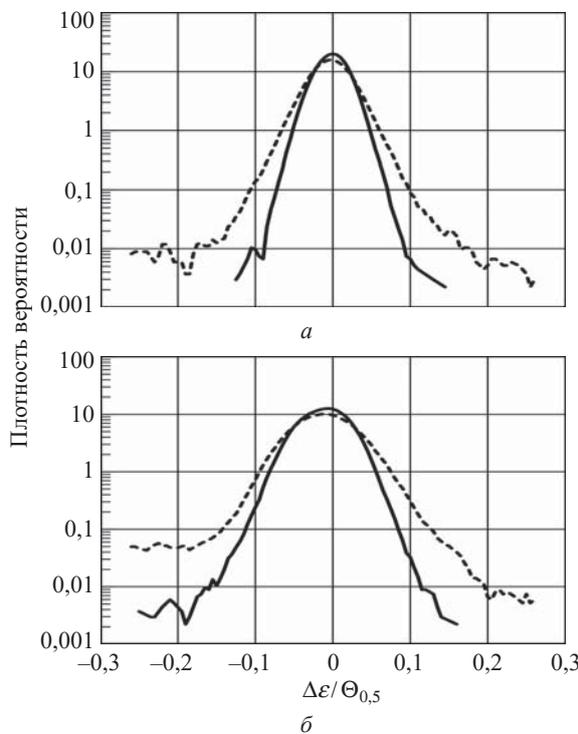


Рис. 5. Распределение ошибок измерения угла места при многочастотных измерениях, ОСШ = 20 дБ: а – сильное зеркальное отражение; б – сильное диффузное отражение; ----- – измерения на одной частоте, ——— – многочастотные измерения

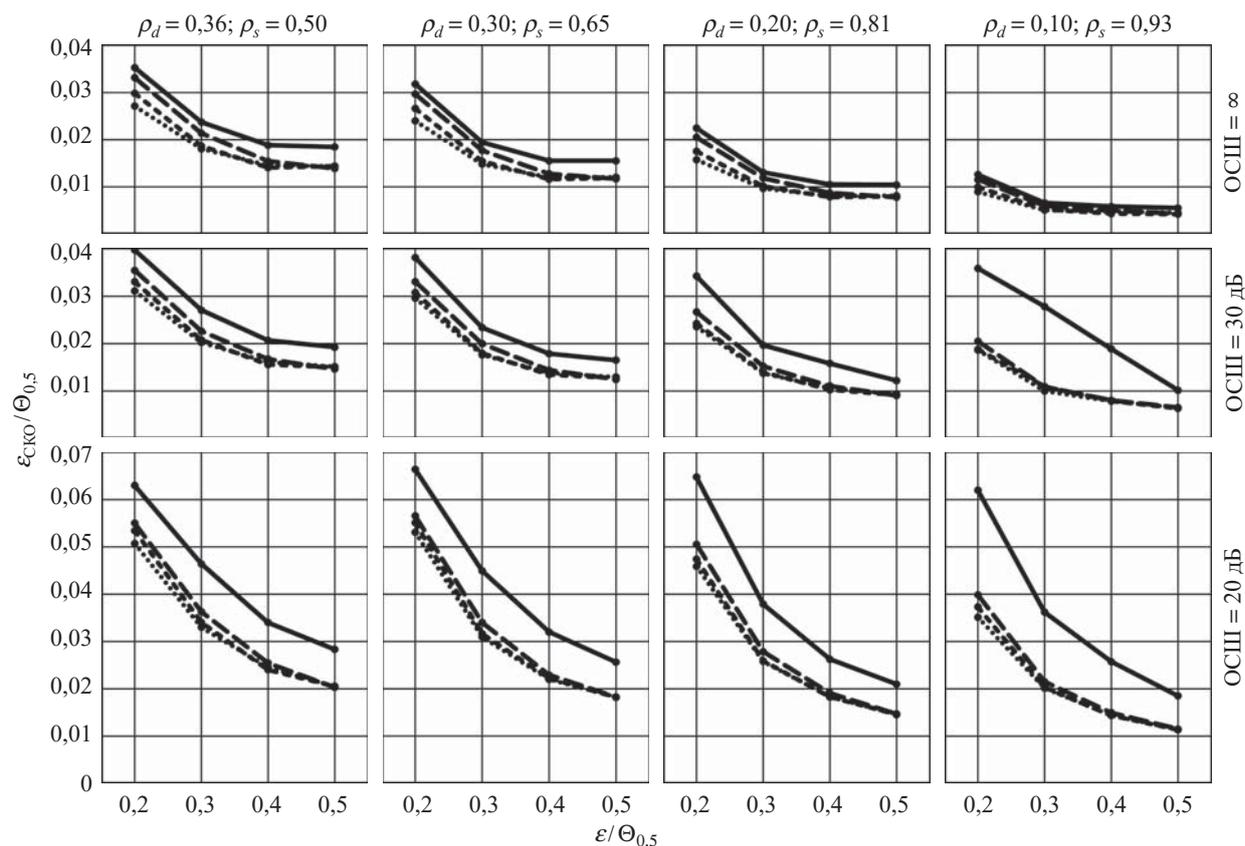


Рис. 6. Ошибки измерения угла места: — — одночастотные измерения; - - - $\Delta f = 2\%$; - · - · $\Delta f = 4\%$; ····· $\Delta f = 8\%$

вой из них. Рассмотрим ситуацию, при которой помехи представлены исключительно многолучевыми сигналами. Ошибки измерения для нее представлены в первой строке графиков на рис. 6 при ОСИ = ∞, а оценка эффективности многочастотных измерений δ , представлена на рис. 7 для 3-х разносов частот. На нем приведены зависимости параметра δ от угловой высоты источника излучения. Левый график получен при разносе частот $\Delta f = 2\%$, средний – 4%, правый – 8%. На каждом графике содержатся по четыре зависимости, относящиеся к различным сочетаниям коэффициентов диффузного и зеркального отражения.

Обратим внимание на график (рис. 7, а), полученный при наименьшем из использованных разносов $\Delta f = 2\%$. На нем наблюдается невысокая эффективность при малых значениях угловой высоты цели ε , а затем – уверенный рост с увеличением ее угловой высоты. Так, если при минимальном значении $\varepsilon = 0,2\Theta_{0,5}$ $\delta = 6...9\%$, то при максимальном значении $\varepsilon = 0,5\Theta_{0,5}$ эффективность достигает зна-

чений $\delta = 22...25\%$. Из этого следует, что при малых угловых высотах разнос частот $\Delta f = 2\%$ не обеспечивает существенное отличие условий интерференции на разных частотах.

Действительно, разность фаз между прямым и зеркальным сигналами $\Delta\varphi$ на некоторой частоте f составляет

$$\Delta\varphi \approx \frac{2\pi f}{\tilde{n}} \frac{2h_r h_t}{D} + \varphi_0,$$

где c – скорость света; φ_0 – фаза отражения зеркальной волны от поверхности моря. Легко показать, что изменение разности фаз между прямым и зеркальным сигналом при переходе от частоты f к частоте $f + \Delta f$ при условии $\varphi_0 \approx \text{const}$ и $h_t/D \approx \varepsilon$ составляет

$$\Delta\Delta\varphi \approx \frac{4\pi\Delta f}{\tilde{n}} h_r \varepsilon.$$

Отсюда следует, что изменение разности фаз пропорционально разносу частот, высоте приемной антенны и угловой высоте цели. Значения этого изменения для трех использован-

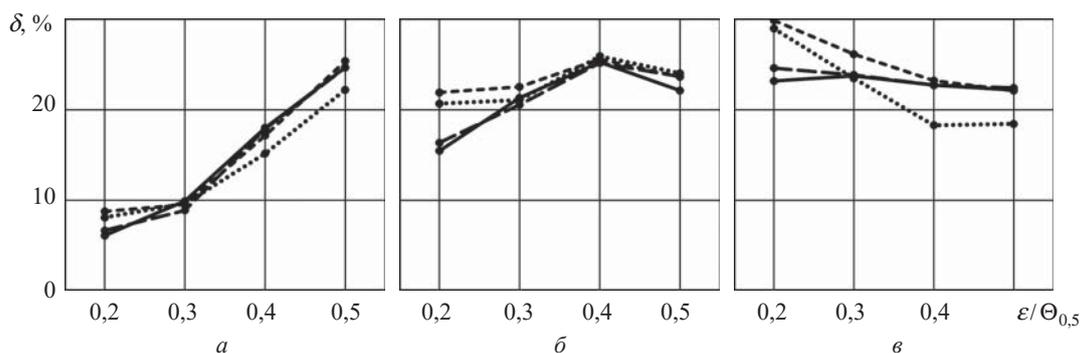


Рис. 7. Повышение точности измерения угла места при учете помех исключительно многолучевого пространства: а – $\Delta f = 2\%$; б – $\Delta f = 4\%$; в – $\Delta f = 8\%$; — $\rho_d = 0,36$; --- $\rho_d = 0,30$; - - - $\rho_d = 0,20$; $\rho_d = 0,10$

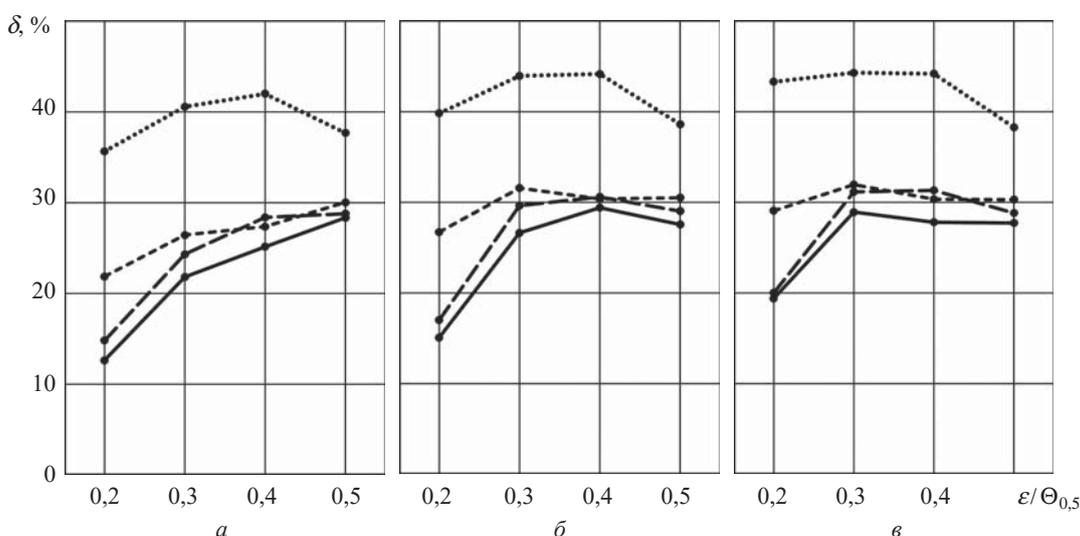


Рис. 8. Повышение точности измерения угла места при учете помех многолучевого распространения и тепловых шумов пеленгатора (ОСШ = 20 дБ): а – $\Delta f = 2\%$; б – $\Delta f = 4\%$; в – $\Delta f = 8\%$; — $\rho_d = 0,36$; --- $\rho_d = 0,30$; - - - $\rho_d = 0,20$; $\rho_d = 0,10$

шихся при расчетах разносах частот и четырех угловых высот цели приведены в табл. 2.

Сопоставив данные табл. 2 с графиками на рис. 7, а, видим, что наибольшая эффективность достигается при значениях $\Delta\Delta\varphi$ не менее 50° . Такой же вывод можно сделать и на основании графиков на рис. 8, полученных при учете не только многолучевых помех, но и тепловых шумов приемного устройства при ОСШ = 20 дБ.

Таблица 2. Изменение разности фаз $\Delta\Delta\varphi$, градусы

$\Delta f, \%$	$\epsilon/\Theta_{0,5}$			
	0,2	0,3	0,4	0,5
2	19	28	38	47
4	38	57	75	94
8	75	113	151	188

На рис. 7 и 8 можно видеть на некоторых участках графиков уменьшение эффективности многочастотной работы при $\Delta\Delta\varphi > 50^\circ$. Такой эффект наблюдается, когда значение $\Delta\Delta\varphi$ находится в окрестности величин кратных 90° . Здесь повышается вероятность экстремумов поля одновременно на двух крайних, а то и на всех трех рабочих частотах. Описанной ситуации соответствуют пониженные значения эффективности многочастотной работы при угловой высоте цели $0,5\Theta_{0,5}$ на рис. 7, б и 8, б, где $\Delta\Delta\varphi = 94^\circ$, а также на рис. 7, в и 8, в, где $\Delta\Delta\varphi = 188^\circ$ (см. табл. 2).

Выводы. Выполнено компьютерное моделирование радиолокационного измерения углов места маловысотных целей над морем с использованием метода *root-MUSIC* при одновременной работе на трех частотах. Учтены

помехи, создаваемые многолучевым отражением от моря и тепловыми шумами в приемных каналах РЛС. Исследование выполнялось как при сильном, так и при слабом диффузном отражении.

Предложен и испытан простой алгоритм получения оценки угла места цели при одновременной работе на трех частотах.

Обоснован выбор разноса частот при многочастотной работе, обеспечивающего существенное повышение точности измерений.

Показано, что использование метода *root-MUSIC* при работе на трех частотах позволяет повысить точность измерений угла места мало-высотных целей на 20...40 % по сравнению со случаем одночастотной работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бартон Д. Радиолокационное сопровождение целей при малых углах места. *Тр. Ин-та инж. по электротехнике и радиоэлектрон.* 1974. Т. 62, № 6. С. 37–61.
2. Марпл.-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. Пер. с англ. под ред. И.С. Рыжака. Москва: Мир, 1990. 584 с.
3. Шахтарин Б.И., Ковригин В.А. Методы спектрального оценивания случайных процессов. Москва: Гелиос АРВ, 2005. 248 с.
4. Педенко Ю.А. Особенности использования метода MUSIC для измерения угла места маловысотных целей над взволнованной поверхностью моря. *Радиофизика и электроника.* 2010. Т. 1(15), № 3. С. 65–70.
5. Педенко Ю.А. Выбор параметров метода *root-MUSIC* при радиолокационном измерении углов места целей вблизи поверхности моря. *Радиофизика и электроника.* 2013. Т. 4(18), № 1. С. 53–58.
6. Педенко Ю.А. Измерение углов места целей над морем с использованием метода *root-MUSIC*. Выбор решения. *Радиофизика и электроника.* 2014. Т. 19, № 4. С. 33–41.
7. Педенко Ю.А. Радиолокационное измерение углов места маловысотных целей над морем методом *root-MUSIC* в условиях помех от сигналов многолучевого распространения и тепловых шумов пеленгатора. *Радиофизика и электроника.* 2016. Т. 7(21), № 1. С. 22–33. DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2016.01.022>.
8. Разсказовский В.Б., Педенко Ю.А. Модель поля миллиметровых и сантиметровых волн над морем для исследования методов измерения углов места низколетающих целей. *Радиофизика и электроника: сб. науч. тр. НАН Украины.* Харьков, 2003. Т. 8, № 1. С. 22–33.

Стаття надійшла 08.08.2019

REFERENCES

1. Barton D.K., 1974. Low-Angle Tracking. *Proc. IEEE*, 62(6), pp. 687–704.
2. Marple, S.L., 1979. *Digital Spectral Analysis with Application*. Translated from English by I.S. Ryzhak. Moscow: Mir Publ. (in Russian).
3. Shahtarin, B.I., Kovrigin, V.A., 2005. *Methods of spectral estimation of random processes*. Moscow: Gelios ARV Publ. (in Russian).
4. Pedenko, Yu.A., 2010. Using of the Music Algorithm to Elevation Angle Measurement of Low-Altitude Targets over Rough Sea Surface. *Radiofiz. Elektron.*, 1(15)(3), pp. 65–70 (in Russian).
5. Pedenko, Yu.A., 2013. The choice of root-MUSIC parameters for radar measurements of target elevation near sea surface. *Radiofiz. Elektron.*, 4(18)(1), pp. 53–58 (in Russian).
6. Pedenko, Yu.A., 2014. Elevation Angle Measurement above the Sea Surface Using the Root-Music Method. Selection of Solutions. *Radiofiz. Elektron.*, 5(19)(4), pp. 33–41 (in Russian).
7. Pedenko, Yu.A., 2016. Radar elevation angles measurements of low-altitude targets over the sea by root-MUSIC method under interference from multipath and thermal noise of direction finder. *Radiofiz. Elektron.*, 7(21)(4), pp. 22–33 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2016.01.022>.
8. Razskazovsky, V.B., Pedenko, Yu.A., 2003. Modeling Millimeter and Centimeter Wavelength Fields over the Sea in the Analysis of Elevation Angle Estimation Methods for Low-Flying Aerial Targets. In: V.M. Yakovenko, ed. 2003. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. 8(1), pp. 22–33 (in Russian).

Received 08.08.2019

Yu.A. Pedenko

O.Ya. Usikov IRE of NASU
12, Acad. Proskura St., Kharkov, 61085, Ukraine

RADAR MULTIFREQUENCY MEASUREMENT OF ELEVATION ANGLES OF LOW-ALTITUDE TARGETS ABOVE THE SEA USING THE *ROOT-MUSIC* METHOD

Subject and Purpose. The article is devoted to the problem of precision radar measurements of target position data when a low-altitude target is above a rough sea. In these circumstances, the thermal noise of the radar receiver and the sea clutter are picked up by the radar antenna in parallel with the target useful signal and are factors affecting measurement accuracy. A particular challenge is the target elevation measurement.

Methods and Methodology. A number of methods are known to significantly improve the measurement accuracy. The *root-MUSIC* method is among them, and the present paper examines a possibility to improve its performance due to multi-frequency measurements. The study is conducted by means of computer simulation using three-frequency X-band radar at the typical conditions: the path length is 2000 m, the antenna array height above the sea level is 12 m, the target angle of altitude is 0.2 to 0.5°. The multi-frequency measurement performance is evaluated by comparison with the single-frequency results obtained in the identical conditions with various sea clutter levels and different thermal noise figures in radar reception channels.

Results. A preliminary analysis has been given to the measurement error distribution during conventional single-frequency measurements through different phases of the interference field structure of the received signal. It has proved the multi-frequency mode of operation as a means for the error reduction in target elevation measurements. The measurement error dependences on target elevation angles were studied with various real-valued frequency separations. Based on three particular estimates at each of the operating frequencies, an algorithm of the generalized estimation of the elevation angle has been developed and tested. An operating frequency separation to keep measuring errors to a minimum has been justified.

Conclusion. It has been shown that a simultaneous use of three operating frequencies can reduce measurement errors by no less than 20...40% compared with the operation at a single frequency.

Key words: *root-MUSIC, multifrequency radar, low-altitude target, elevation angle, multipath, thermal noise, simulation, measurement errors.*

Ю.А. Педенко

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України
12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна

РАДИОЛОКАЦІЙНЕ БАГАТОЧАСТОТНЕ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ МІСЦЯ МАЛОВИСОТНИХ ЦІЛЕЙ НАД МОРЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ *ROOT-MUSIC*

Предмет і мета роботи. Статтю присвячено проблемі високоточних радіолокаційних вимірювань координат цілей, розташованих на малій висоті поблизу схвильованої поверхні моря. За таких умов точним вимірюванням, поряд з тепловими шумами приймача радіолокаційної станції (РЛС), перешкоджають завади, створені відбитками радіохвиль від моря, що приймаються антеною РЛС нарівні з корисними сигналами від цілі. Особливо гостро постає проблема вимірювання кутів місця цілей.

Методи і методологія роботи. Відома низка методів, що дозволяють істотно підвищити їх точність, в тому числі метод *root-MUSIC*. У цій роботі досліджено можливості підвищення ефективності цього методу за рахунок багаточастотних вимірювань. Дослідження проводилося шляхом комп'ютерного моделювання з використанням тричастотної РЛС X-діапазону. При моделюванні використовувалися типові умови: довжина траси – 2000 м, висота антенної решітки над рівнем моря – 12 м, кутова висота цілі – від 0,2 до 0,5°. Ефективність багаточастотних вимірювань визначалася шляхом порівняння їх з результатами одночастотних вимірювань в ідентичних умовах, у тому числі для різних рівнів завад від моря і теплових шумів у приймальних каналах РЛС.

Результати роботи. Виконано попередньо аналіз розподілів похибок вимірювання, що отримані при звичайних одночастотних вимірюваннях у різних фазах інтерференційної структури поля сигналів. Його висновки слугують обґрунтуванням багаточастотного режиму роботи як засобу зменшення похибок вимірювання кута місця цілі. Досліджено залежності похибок вимірювання від кута місця цілі для різних реальних розносах частот. Запропоновано та випробувано алгоритм формування узагальненої оцінки кута місця на основі трьох окремих оцінок, що отримані на кожній з робочих частот. Обґрунтовано величину розносу робочих частот, при якому помилки вимірювання досягають мінімальних значень.

Висновок. Показано, що одночасне використання трьох робочих частот дозволяє зменшити похибки вимірювання не менше ніж на 20...40 % порівняно з роботою на одній частоті.

Ключові слова: *root-MUSIC, багаточастотна РЛС, маловисотна ціль, кут місця, багатопроменеве поширення, тепловий шум, моделювання, похибки вимірювання.*